

级联掺磷拉曼光纤激光器的理论研究

学校编码：10384

学号：23120061152497

分类号_____密级_____

UDC _____



硕 士 学 位 论 文

级联掺磷拉曼光纤激光器的理论研究

Theoretical Research on P-doped Cascaded Raman Fiber Laser

蔡伟琦

蔡伟琦

指导教师 蔡志平 教授

指导教师姓名：蔡 志 平 教授

专 业 名 称：电 路 与 系 统

论文提交日期：2009 年 4 月

论文答辩时间：2009 年 5 月

学位授予日期：2009 年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2009 年 5 月

厦 门 大 学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):
年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着全球通信业务快速增长,人们对新一代光纤通信系统的容量提出了越来越高的要求,从而也相应地对现代光通信系统核心部件之一的光放大器提出了更大的挑战。目前,拉曼光纤放大器是最具有潜力和发展前景的光放大器之一,然而首要问题是寻找拉曼光纤放大器合适的泵浦源。拉曼光纤激光器因其具有高功率输出及激射波长灵活可调等特性,成为光通信系统中理想的泵浦源。

拉曼光纤激光器是基于受激拉曼散射效应的光纤激光器,只要具备合适的泵浦源,就能够在很大波长范围内获得激光输出。本文在级联拉曼光纤激光器理论模型的基础上,对二级级联掺磷拉曼光纤激光器中表征受激拉曼散射效应的非线性耦合方程组进行分析和求解,并与数值方法以及实验结果进行了比较。本文主要研究内容如下:

首先,阐述了受激拉曼散射的基本原理,建立了级联拉曼光纤激光器的理论模型,得到了表征受激拉曼散射效应的非线性耦合方程组及其边界条件。

其次,利用线性模型求出了二级级联掺磷拉曼光纤激光器各级光输出功率的显式近似解析解。先定义各级光的几何平均功率与增益因子,并将描述泵浦光和斯托克斯光沿光纤分布的微分方程组简化成代数方程组,然后利用线性方法和 Lambert-W 函数求得了各级光的近似输出功率。在此基础上假设输出泵浦功率曲线在整个输入功率区间是分段线性的,求出了相对误差表达式。模拟结果表明,此假设在光纤长度和输出光纤光栅反射率的很大变化范围内均能够近似成立,获得的结果对级联拉曼激光器的简化计算和设计具有较好的指导意义。

最后,利用非线性方法得到了二级级联掺磷拉曼光纤激光器的二阶近似解。先对泵浦光的增益因子进行二阶近似,以此得到了不同输入泵浦功率情况下的近似解,然后详细介绍了针对本微分方程组的数值解法,再与二阶方法及线性方法做比较,文末还通过实验与二阶方法进行了有意义的对比。结果表明,对于双波长输出的二级级联掺磷拉曼光纤激光器而言,二阶方法比线性方法更加精确,更接近于一般的数值解,对实验设计具有较好的指导意义,而且二阶方法能有效提高数值运算速度,优于数值方法。

关键词: 拉曼光纤激光器; 线性方法; 二阶方法

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

With the rapid development of the global communications, the ultrahigh capacity of a new generation of optical fiber communication system is demanded urgently. Therefore, optical amplifiers are encountering a great challenge as one of the vital components of optical communication system. Currently, as a new generation of amplifier, Raman fiber amplifier has been thought as an ideal and potential solution. However, the key problem is how to find a suitable Raman pump source. Due to Raman fiber laser with high power output and the flexible lasing wavelength, it can perfectly meet the requirements of Raman pump sources.

Based on the stimulated Raman scattering in fibers, Raman fiber laser can generate laser over a wide range of wavelength once appropriate pump sources are available. With the help of model building of cascaded Raman fiber laser, the nonlinear coupled equations which used to describe stimulated Raman scattering in fibers are analyzed and solved, also compared and contrasted the solution with the numerical methods and experimental results. The main contents of the paper are as follows:

Firstly, the basic theory of stimulated Raman scattering is introduced in detail. Model building of cascaded Raman fiber laser and the nonlinear coupled equations with boundary conditions are given.

Secondly, the approximate explicit solution of optical output powers for P-doped cascaded Raman fiber laser were acquired by linear model. With the aid of average powers and gain factors, the differential equations depicting the distribution of pump and Stokes radiations along Raman fiber were simplified to the algebraic equations. Therefore the approximate optical output powers were got by linear method and Lambert-W function. Then the output power curves in the whole range of input pump powers were assumed to be piecewise linear, so the relative error expression was obtained. The simulation showed that the assumption was reasonable in the large range of the fiber length and the reflectivity of fiber grating. The results provided

better guidance to simplify the calculation and design on the cascade Raman lasers.

Lastly, the second-order approximate solution of P-doped cascaded Raman fiber laser was obtained by nonlinear method. It was gained by adopting second-order nonlinear method in gain factor. Then a detailed introduction was given to numerical methods. Comparing second-order solution and linear explicit solution with numerical simulation and experimental data, the results showed that the second-order method was more accurate than the linear method. It could provide better guidance to the experimental design aiming at dual-wavelength outputs and the method effectively improved operation speed. It was superior to general numerical methods.

Key Words: Raman Fiber laser; linear method; second-order method

目 录

第一章 绪论..... 1

1.1 光纤激光器的研究现状 1

1.2 光纤激光器的特点及其主要类型 2

1.2.1 稀土类掺杂光纤激光器 3

1.2.2 单晶光纤激光器 3

1.2.3 塑料光纤激光器 3

1.2.4 光子晶体光纤激光器 4

1.2.5 光纤非线性效应激光器 4

1.3 本论文研究目的和内容 5

第二章 拉曼散射原理与拉曼光纤放大器 7

2.1 受激拉曼散射 7

2.2 光纤中的拉曼散射 9

2.3 拉曼阈值 12

2.4 拉曼光纤放大器概述 13

2.4.1 拉曼光纤放大器的优势 13

2.4.2 拉曼光纤放大器的国内外研究进展 14

2.4.3 拉曼光纤放大器的分类 15

2.4.4 拉曼光纤放大器的基本结构 16

2.5 拉曼光纤放大器的主要特性 17

2.5.1 增益饱和特性 17

2.5.2 偏振特性 18

2.5.3 噪声特性 18

2.5.4 带宽特性 20

2.6 小结 20

第三章 级联拉曼光纤激光器及其理论模型..... 21

3.1 拉曼光纤放大器的泵浦源 21

3.2 级联拉曼光纤激光器的两种基本结构 23

3.2.1 线形腔级联拉曼光纤激光器 23

3.2.2 环形腔级联拉曼光纤激光器 25

3.3 级联拉曼光纤激光器的数学建模 26

3.4 小结 31

第四章 二级级联掺磷拉曼激光器的线性解析 32

4.1 二级级联掺磷拉曼光纤激光器的初步理论分析 32

4.2 线性近似解析解 36

4.3 线性近似简化及其误差估计	41
4.4 误差比较	44
4.5 小结	47
第五章 二级级联掺磷拉曼激光器的非线性近似.....	49
5.1 二阶方法	49
5.2 数值方法求解.....	55
5.3 理论结果与数值模拟的比较	63
5.4 理论与实验结果的比较	67
5.5 小结	76
第六章 总结与展望.....	77
6.1 本文的主要工作	77
6.2 本文的创新之处	78
6.3 今后工作展望.....	78
参考文献	80
攻读硕士期间取得的研究成果.....	84
致 谢	85

Contents

Chapter 1 Prolegomenon.....	1
1.1 Current Research on Fiber Lasers.....	1
1.2 Characteristics and Types of Fiber Lasers.....	2
1.2.1 RE-doped Fiber Laser	3
1.2.2 Crystal Fiber Laser.....	3
1.2.3 Plastic Fiber Laser.....	3
1.2.4 Photonic Crystal Fiber Laser	4
1.2.5 Nonlinear Fiber Effect Laser.....	4
1.3 Purpose and Content of the Dissertation.....	5
Chapter 2 Principle of Raman Scattering and RFA.....	7
2.1 Stimulated Raman Scattering.....	7
2.2 Raman Scattering in Fiber	9
2.3 Threshold of SRS	12
2.4 Summarize of Raman Fiber Amplifier	13
2.4.1 The Advantage of RFA	13
2.4.2 Research Progress on RFA.....	14
2.4.3 Types of RFA	15
2.4.4 Basic Structure of RFA	16
2.5 Characteristics of RFA.....	17
2.5.1 Gain Saturation Characteristics.....	17
2.5.2 Polarization Characteristics	18
2.5.3 Noise Characteristics	18
2.5.4 Bandwidth Characteristics	20
2.6 Summary	20
Chapter 3 Cascaded Raman Fiber Laser and Theoretical Model	21
3.1 Pump Source of RFA.....	21
3.2 Basic Structure of Cascaded RFL	23
3.2.1 Linear Cavity Cascaded RFL.....	23
3.2.2 Ring Cavity Cascaded RFL	25
3.3 Theoretical Model of Cascaded RFL.....	26
3.4 Summary	31
Chapter 4 Linear Analytic Solution of P-doped Cascaded RFL	32
4.1 Preliminary Analysis of P-doped Cascaded RFL	32
4.2 Approximate Linear Analytic Solution.....	36

4.3 Simplify the Linear Approximation and Error Estimation.....	41
4.4 Error Comparison	44
4.5 Summary	47
Chapter 5 Non-linear Approximation of P-doped Cascaded RFL.....	49
5.1 Second-order Method.....	49
5.2 Numerical Methods	55
5.3 Comparison between Theory and Numerical Methods	63
5.4 Comparison between Theory and Experimental Results	67
5.5 Summary	76
Chapter 6 Summary and Expectation	77
6.1 The Main Contribution of the Dissertation.....	77
6.2 Innovative Points	78
6.3 Future Prospect of Work.....	78
References	80
Published Papers.....	84
Acknowledgements	85

第一章 绪论

随着因特网、综合业务数字网和多媒体技术的发展以及全球通信量爆炸性增长，人们对通信容量的要求越来越高。由于光纤具有近 30 THz 的巨大潜在带宽容量以及价格低廉等优点而成为了信息承载的主体，光纤通信网络逐渐构成了通信网的骨干和核心。

自 20 世纪 70 年代以来，每隔几年光纤通信技术就会上升到一个新的台阶。光纤通信由最初的第一代城市局间中继的光纤通信系统，发展到以密集波分复用与掺铒光纤放大器相结合的第四代光纤通信系统和以光孤子为信息载体的第五代光纤通信系统。

光纤激光器作为光通信系统中传输的重要组成部分，在 20 世纪 90 年代后期，随着半导体激光器及掺杂光纤制作技术的日益成熟，对于它的研究也取得了重大进展^[1-3]。作为第三代激光技术的代表，光纤激光器被称为近二十年来最伟大的发明之一，其卓越而独特的优点使它在各个领域有着重要的应用。

1.1 光纤激光器的研究现状

自从 1964 年世界上第一台光纤激光器掺 Nd³⁺ 光纤激光器^[4]问世以来，随着光纤制造工艺和半导体激光器生产技术日趋成熟，光纤激光器的迅猛发展成为了一种不可阻挡的潮流。1970 年，美国康宁公司第一根低损耗光纤研制成功，使光纤激光器实用化成为了可能。1986 年英国南安普顿大学研制出了第一只掺铒光纤放大器，使得可以直接对光信号进行放大，实现全光中继。1988 年，美国宝丽来公司 Snitzer 等人^[5,6]发展了一种包层泵浦技术，提高了整个光纤激光器的光-光转换效率和输出功率，为高功率激光器的发展奠定了基础。1999 年 V.Dominic 等人报道了输出功率高达 110 W 的掺 Yb 双包层光纤激光器^[7]。2002 年 CLEO 会议上报道了 Yb:Nd 共掺的双包层光纤激光器连续输出功率可达 150 W^[8]。2003 年，英国 Southampton Photonics.Inc 报道了 270 W 单模激光输出的掺 Yb 光纤激光器。2006 年美国 IPG 公司成功实现了连续输出功率高达 3 kW 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器。

国内方面，2000 年第一台级联拉曼光纤激光器由南开大学率先研制成功^[9]。

2006 年, 厦门大学用全固体激光器泵浦实现了 800 mW/1484 nm 的二级拉曼激光输出^[10]。此外, 上海光机所、北京大学、清华大学、电子科技大学等科研院所和学校也对光纤激光器展开了相关的研究工作, 无论在理论研究上还是实验方面都取得了很大的进展^[11-13]。

1.2 光纤激光器的特点及其主要类型

光纤激光器有许多优点, 体现在:

- (1) 激光增益介质本身就是波导介质, 耦合效率高, 纤芯直径小, 容易形成高功率密度。
- (2) 增益介质长, 光纤激光器能很方便的延长增益长度使泵浦光充分吸收。
- (3) 容易实现单模、单频运转和超短脉冲。
- (4) 具有许多可调谐参数和选择性, 能获得很宽的调谐范围, 良好的单色性和高稳定性, 其泵浦寿命长, 平均无故障工作时间长。
- (5) 光纤激光器可在很宽的光谱范围内运行, 还可以多波长输出。

和半导体激光器相比, 光纤激光器的优越性明显: 光纤激光器是波导式结构, 可容强泵浦, 具有高增益、转换效率高、阈值低、输出光束质量好、线宽窄、结构简单、可靠性高、易于实现和光纤的耦合等特点。

光纤激光器种类很多, 根据其激射机理、器件结构和输出激光特性的不同有多种分类方式。其分类方式主要有以下几种:

- (1) 按输出波长分类: S 波段(1460 nm-1530 nm)、C 波段(1530 nm-1565 nm)、L 波段(1565 nm-1610 nm)。
- (2) 按输出激光状态分类: 连续光纤激光器, 超短脉冲光纤激光器等。
- (3) 按谐振腔结构分类: Fabry-Perot 腔、环形腔、复合腔等。
- (4) 按输出光波分类: 单波长光纤激光器, 多波长光纤激光器。
- (5) 根据激光的增益介质分类: 稀土离子掺杂光纤激光器(Nd^{3+} 、 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 等)、单晶光纤激光器、塑料光纤激光器、光子晶体光纤激光器、光纤非线性效应激光器。

下面根据激光的增益介质分类来详细介绍主要的光纤激光器类型。

1.2.1 稀土类掺杂光纤激光器

这类激光器利用所掺杂稀土元素的吸收带吸收泵浦实现粒子数反转，然后受激辐射产生激光。这些稀土元素包括： Yb^{3+} 、 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Dr^{3+} 以及 Pr^{3+} 等。

掺 Er^{3+} 光纤激光器输出波长对应光通信 1.5 μm 的主要窗口，是目前通信领域应用最广泛和技术最成熟的光纤激光器。掺 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 光纤激光器的输出波长在 2.0 μm 左右，由于水分子在该波长附近有很强的中红外吸收峰，因此用该波段激光器进行手术时，激光照射部位血液迅速凝结，手术创面小，止血性好，又由于该波段激光对人眼是安全的，所以掺 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 光纤激光器在医疗和生物学研究方面有广泛的应用前景^[14]。另外掺 Yb^{3+} 的双包层光纤激光器输出功率大，输出波长在光纤窗口附近，具有耦合效率高等特点，是制备高功率光纤激光器的首选途径，也是拉曼光纤激光器的最佳泵浦源。此外 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 共掺，可以使 1550 nm 波段的光纤激光器性能得到更大提高，是目前高功率激光器的研究对象之一。

1.2.2 单晶光纤激光器

单晶光纤主要有：红宝石、Nd:YAG、Ti:蓝宝石、Cr:Al₂O₃、LiNbO₃、Yb:LiNbO₃等。拉制光纤的单晶与同类块状或棒状的晶体相比，具有更优越的性能。其中LiNbO₃单晶光纤由于在倍频激光器中的潜在应用，引起人们很大兴趣。但目前LiNbO₃单晶光纤制备技术还不够完善，传输光的特性较差，在一定程度上限制了其应用。

1.2.3 塑料光纤激光器

塑料光纤激光器是指在塑料光纤纤芯或包层充入染料制成的激光器，它一般只用在较短距离的光纤通信系统中。塑料光纤由于存在透光性差、熔接损耗大、传输频带窄等缺陷，而且在制作工艺上也存在一定难度等一系列原因，限制了塑料光纤激光器的发展。

1.2.4 光子晶体光纤激光器

1987 年, 美国贝尔通讯研究中心的物理学家 E.Yablonovitch 和加拿大物理学家 S.John 几乎同时提出了光子晶体这一新概念^[15,16]。如果将不同介电常数的介电材料构成周期结构, 并在一维、二维或三维空间中形成折射率的周期性分布, 由于布拉格散射, 电磁波在其中传播时会受到调制而形成能带结构, 这种能带结构叫做光子能带。光子能带之间具有带隙, 即光子带隙。这种具有光子带隙的周期性介电结构就是光子晶体, 也称为光子带隙材料。目前, 光子晶体已有了较大发展。1992 年, 英国 Bath 大学 R.J.Russell 领导的研究小组提出了光子晶体光纤的思想^[17], 并于 1996 年首次制造了具有光子晶体包层的光子晶体光纤^[18]。2000 年 W.J.Wadsworth 等第一次实验报道了连续掺镱微结构的光纤激光器^[19]。由于光子晶体光纤可以通过改变光纤中气孔的尺寸和间距方便地改变其导波性质, 具有很大的设计自由度, 因而具有许多传统光纤难以实现的优良特性, 显示着巨大的应用发展潜力。

1.2.5 光纤非线性效应激光器

光纤非线性效应激光器是利用激光在光纤中的非线性效应制成的, 目前这类光纤激光器发展较为迅速, 主要应用在光纤通信、光纤陀螺、光纤传感以及波分复用系统中。其主要分为两大类: 光纤受激拉曼散射激光器和光纤受激布里渊散射激光器。

光纤受激拉曼散射激光器一直以来都是光纤激光器研究领域的一个热点, 与掺稀土的光纤激光器相比, 它具有更高饱和功率和无泵浦源限制等优点。它是基于光纤受激拉曼散射效应的一种光纤激光器。

而光纤受激布里渊散射激光器是基于光纤中的受激布里渊散射效应的一种光纤激光器, 它具有线宽窄、频率稳定、增益方向敏感等优点。但目前这类激光器的发展略显滞后, 主要由于两个本征偏振态致使受激布里渊散射不稳定, 进而导致激光输出的频率和功率不稳定。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕